

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Автоматизированный электропривод»

**М. Н. Погуляев, В. В. Логвин, В. С. Захаренко**

## **ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
к контрольным работам по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
заочной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2009**

УДК 62-83-52:681.51(075.8)  
ББК 31.291я73  
П43

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
заочного факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 15.06.2007 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Промышленная электроника» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*Е. А. Храбров*

**Поголяев, М. Н.**

П43      Элементы автоматизированного электропривода : метод. указания к контрол. работам по одноим. дисциплине для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заоч. формы обучения / М. Н. Поголяев, В. В. Логвин, В. С. Захаренко. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2009. – 24 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-420-797-1.

Изложен порядок расчета характеристик нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ в режиме непрерывного и прерывистого токов, дано задание к контрольной работе, приведены теоретические вопросы.

Для студентов специальности 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» заочной формы обучения.

УДК 62-83-52:681.51(075.8)  
ББК 31.291я73

ISBN 978-985-420-797-1

© Поголяев М. Н., Логвин В. В., Захаренко В. С.,  
2009

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2009

## 1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Выполнение контрольной работы является важным этапом в самостоятельной работе студентов заочной формы обучения над дисциплиной и должно свидетельствовать о том, что соответствующие разделы курса проработаны и глубоко усвоены. Для облегчения изучения курса «Элементы автоматизированного электропривода» учебными планами предусмотрены лекции по отдельным его разделам, лабораторные и практические занятия.

Задание на контрольную работу состоит из двух пунктов: 1) решение задачи; 2) ответ на теоретический вопрос.

Варианты заданий контрольной работы выдаются преподавателем.

Студенты должны выполнить данную контрольную работу в сроки, установленные учебным планом.

При оформлении контрольной работы студенты должны придерживаться следующих требований:

1. На титульном листе контрольной работы должны быть указаны название учреждения образования, факультет, кафедра, дисциплина, номер варианта, фамилия, имя, отчество студента, курс, группа, адрес студента.

2. Контрольные работы оформляются в тетради аккуратно, без помарок и должны быть выполнены так, чтобы можно было без затруднений прочесть каждую букву, знак, слово. Работы, оформленные небрежно, вызывающие затруднение и сомнение при их чтении, возвращаются студенту для переработки. Допускается оформление контрольной работы на листах формата А4, которые должны быть сшиты и иметь правильно оформленный титульный лист.

3. Страницы тетради должны быть пронумерованы, на каждой из них следует оставлять поле шириной не менее 25 мм.

4. Все расчетные действия должны сопровождаться краткими, но четкими пояснениями. Обозначение величин в тексте, формулах, схемах должны быть согласованы и расшифрованы.

5. Схемы, рисунки должны выполняться с применением чертежных инструментов. При выполнении схем следует руководствоваться правилами ЕСКД. Схемы, рисунки должны быть пронумерованы и иметь подрисовочные надписи. В тексте контрольной работы нужны обязательно ссылки на соответствующие схемы и рисунки.

6. В тексте вначале записывается расчетная формула в общем виде, а затем с проставленными числовыми значениями. В конце ка-

ждой расчетной формулы обязательно указывается размерность полученных величин в системе СИ и при необходимости номер формулы. Результаты повторяющихся расчетов следует сводить в таблицы.

7. В излагаемый материал обязательно включаются используемые методики расчета, основные допущения и обозначения. При использовании графиков, численных коэффициентов, формул и методик необходимо делать ссылки на соответствующие литературные источники. Не допускается сокращение слов, кроме общепринятых.

## **2. ЗАДАНИЕ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ** (Номер варианта задания выдается преподавателем)

### ***2.1. Рассчитать и построить характеристики нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ в режиме прерывистого и непрерывного токов***

При выполнении п. 2.1 необходимо выполнить следующее:

1. Изобразить функциональную схему трехфазного нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ.

2. Рассчитать и выбрать силовой трансформатор для питания тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ.

3. Рассчитать и построить внешние характеристики тиристорного преобразователя в режиме прерывистого и непрерывного токов при углах управления:  $\alpha = 15^\circ$ ,  $\alpha = 30^\circ$ ,  $\alpha = 45^\circ$ ,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\alpha = 75^\circ$ ,  $\alpha = 90^\circ$ . Ток нагрузки изменять в пределах от 0 до  $1,2 \cdot I_{d,ном}$ .

4. Построить скоростные характеристики ДПТ в режиме прерывистых и непрерывных токов при тех же углах управления  $\alpha$ .

5. Построить характеристики управления ТП при  $I_d = 0$ ,  $0,5 \cdot I_{d,гр}$  и  $I_{d,гр}$ , где значение тока  $I_{d,гр}$  брать при угле управления  $\alpha = 75^\circ$ . Форма опорного напряжения – линейная пилообразная, амплитудное значение  $U_{оп,мах} = 12$  В.

6. Рассчитать и построить временные диаграммы напряжения и тока в нагрузке при угле управления  $\alpha$  и токе нагрузки  $I_d$ , указанных в табл. 1.1.

### ***2.2. Ответить на теоретический вопрос***

Данные ДПТ НВ, который является нагрузкой рассматриваемого тиристорного преобразователя, выбираются из приложения (табл. П.1.1) в соответствии с заданным вариантом и записываются в табл. 2.1.

## Исходные данные к расчету нереверсивного мостового ТП

Номер варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{ном}}$ , В	$\eta$ , %	$R_{\text{я}}$ , Ом	$R_{\text{дп}}$ , Ом	$L_{\text{я}}$ , мГн	$n_{\text{ном}}$ , об/мин	$\alpha$ , град.	$I_d/I_{d\text{гр}}$ ( $I_{d\text{гр}}$ при $\alpha$ п. 10)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

### 3. РЕКОМЕНДАЦИИ К ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

3.1. Функциональная схема трехфазного нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ представлена на рис. 3.1.

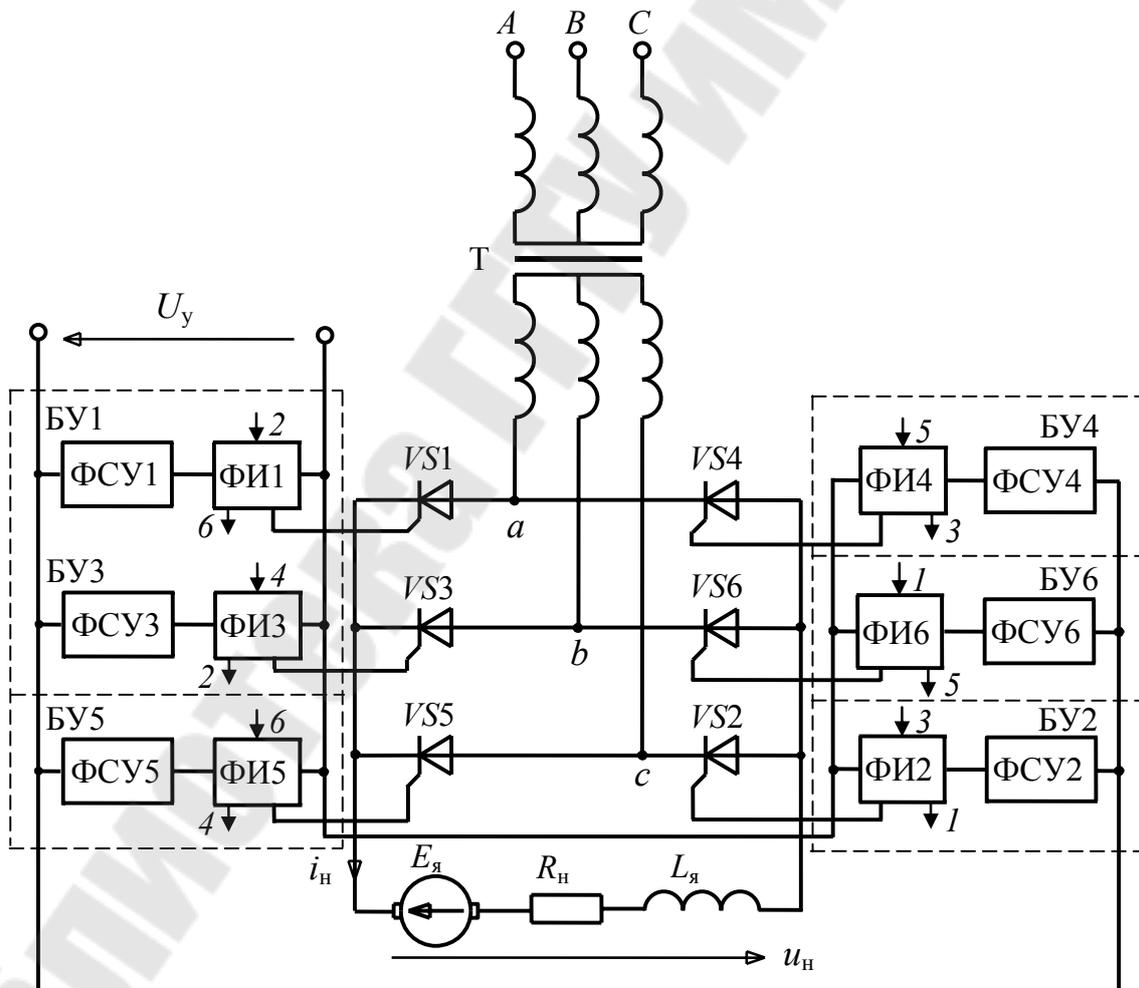


Рис. 3.1. Функциональная схема трехфазного нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ

### 3.2. Расчет и выбор силового трансформатора для питания тиристорного преобразователя

Выбор силового трансформатора производится по расчетным значениям тока  $I_{2\text{расч}}$ , напряжению  $U_{2\text{ф.расч}}$  и типовой мощности  $S_T$ . Напряжение первичной обмотки  $U_{1\text{ф}}$  должно соответствовать напряжению питающей сети (380/220 В).

Расчетное значение напряжения  $U_{2\text{ф.расч}}$  вторичной обмотки трансформатора, питающего ТП в режиме непрерывных токов, с учетом необходимого запаса на падение напряжения в силовой части, определяется формулой [2]:

$$U_{2\text{ф.расч}} = k_u k_c k_\alpha k_R U_{d.\text{ном}}, \quad (3.1)$$

где  $k_u = 0,427$  – коэффициент, характеризующий отношение напряжений  $U_{2\text{ф}}/U_{d0}$  в идеальном трехфазном мостовом выпрямителе;  $k_c = 1,1$  – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное снижение напряжения сети;  $k_\alpha = 1,1$  – коэффициент запаса, учитывающий неполное открытие вентиля при максимальном управляющем сигнале;  $k_R = 1,05$  – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий падение напряжения в обмотках трансформатора, в вентилях и при коммутации;  $U_{d.\text{ном}}$  – номинальное напряжение на выходе преобразователя, равное номинальному напряжению двигателя,  $U_{d.\text{ном}} = U_{\text{ном}}$ .

Расчетное значение действующего тока вторичной обмотки [2]:

$$I_{2\text{расч}} = k_I k_i I_{d.\text{ном}}, \quad (3.2)$$

где  $k_I = 0,815$  – коэффициент схемы, характеризующий отношение токов  $I_{2\text{ф}}/I_d$  в идеальной мостовой схеме;  $k_i = 1,1$  – коэффициент, учитывающий отклонение формы анодного тока вентиля от прямоугольной;  $I_{d.\text{ном}}$  – значение номинального тока двигателя:

$$I_{d.\text{ном}} = \frac{P_{\text{ном}}}{\eta_{\text{ном}} \cdot U_{\text{ном}}}, \quad (3.3)$$

где  $P_{\text{ном}}$  – номинальная мощность электродвигателя;  $\eta_{\text{ном}}$  – номинальный КПД электродвигателя;  $U_{\text{ном}}$  – номинальное напряжение электродвигателя.

Рассчитываем (предварительно) действующее значение тока первичной обмотки трансформатора:

$$I_1' = \frac{1}{k_{\text{тр}}} \cdot k_{i1} \cdot I_{d.\text{ном}}, \quad (3.4)$$

где  $k_{\text{тр}}$  – расчетный коэффициент трансформации трансформатора:

$$k_{\text{тр}}' = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi.\text{расч}}}, \quad (3.5)$$

где  $U_{1\phi}$  – фазное напряжение первичной обмотки трансформатора,  $U_{1\phi} = 220 \text{ В}$ ;  $k_{i1}$  – схемный коэффициент первичного тока. Для мостовой схемы  $k_{i1} = 0,815$ .

Мощность первичной обмотки трансформатора:

$$S_1 = m_1 \cdot I_1' \cdot U_{1\phi}, \quad (3.6)$$

где  $m_1$  – число фаз первичной обмотки,  $m_1 = 3$ .

Мощность вторичной обмотки трансформатора:

$$S_2 = m_2 \cdot I_{2\text{расч}} \cdot U_{2\phi}, \quad (3.7)$$

где  $m_2$  – число фаз вторичной обмотки трансформатора,  $m_2 = 3$ ;  $I_{2\text{расч}}$  – действующее значение вторичного тока трансформатора, по формуле (3.2);  $U_{2\phi}$  – фазное напряжение вторичной обмотки трансформатора. Ориентировочно принимаем  $U_{2\phi} = U_{2\phi.\text{расч}}$ .

Типовая мощность трансформатора

$$S_{\text{Т}} = \frac{S_1 + S_2}{2}. \quad (3.8)$$

Трансформатор выбираем из условий:

– номинальное фазное напряжение вторичной (вентильной) обмотки трансформатора должно быть близким к значению  $U_{2\phi.\text{расч}}$ :  $0,95 \cdot U_{2\phi.\text{расч}} \leq U_{2\phi.\text{ном}} \leq 1,2 \cdot U_{2\phi.\text{расч}}$ ;

– ток вторичной обмотки трансформатора должно быть больше или равен  $I_{2\text{расч}}$ :  $I_{2\text{ном}} \geq I_{2\text{расч}}$ ;

– номинальная мощность трансформатора должна быть больше или равна типовой:  $S_{\text{ном}} \geq S_{\text{Т}}$ .

Трансформатор выбирается по [3, табл. 8.5]. Обратите внимание на то, что в справочнике приводятся номинальные значения линейных напряжений обмоток.

Параметры выбранного трансформатора сводятся в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Параметры силового трансформатора**

Наименование	Обозначение	Величина
Номинальная мощность, кВА	$S_{\text{НОМ}}$	
Напряжение вентильной обмотки (линейное), В	$U_{2\text{НОМ}}$	
Ток вентильной обмотки, А	$I_{2\text{НОМ}}$	
Напряжение сетевой обмотки (линейное), В	$U_{1\text{НОМ}}$	
Мощность холостого хода, Вт	$P_{\text{ХХ}}$	
Мощность короткого замыкания, Вт	$P_{\text{КЗ}}$	
Напряжение короткого замыкания, %	$U_{\text{КЗ}}$	
Ток холостого хода, %	$I_{\text{ХХ}}$	

Рассчитываем действительный коэффициент трансформации выбранного трансформатора:

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_{1\text{НОМ}}}{U_{2\text{НОМ}}} = \frac{U_{1\text{ф.НОМ}}}{U_{2\text{ф.НОМ}}}, \quad (3.9)$$

где  $U_{1\text{ф.НОМ}} = U_{1\text{НОМ}} / \sqrt{3}$ ,  $U_{2\text{ф.НОМ}} = U_{2\text{НОМ}} / \sqrt{3}$  – номинальные значения фазного напряжения первичной и вторичной обмоток.

Действительные значения рабочих токов первичной и вторичной обмоток:

$$I_2 = I_{2\text{расч}},$$

$$I_1 = \frac{I_2}{k_{\text{тр}}}. \quad (3.10)$$

Находим полное, активное и индуктивное сопротивления трансформатора, приведенные к вторичной обмотке:

$$Z_{2\text{T}} = \frac{U_{\text{КЗ}\%}}{100} \cdot \frac{U_{2\text{л.НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot I_{2\text{ф.НОМ}}}, \quad (3.11)$$

где  $U_{\text{КЗ}\%}$  – напряжение короткого замыкания (табл. 3.1);  $U_{2\text{НОМ}}$  – номинальное линейное напряжение вторичной (вентильной) обмотки трансформатора;

Активное сопротивление, приведенное к вторичной обмотке трансформатора:

$$r_{2T} = \frac{P_{кз}}{3 \cdot I_{2ф.ном}^2}, \quad (3.12)$$

где  $P_{кз}$  – мощность короткого замыкания (из табл. 3.1;  $I_{2ф.ном}$  – номинальный ток вентильной (вторичной) обмотки.

Индуктивное сопротивление, приведенное к вторичной обмотке трансформатора

$$x_{2T} = \sqrt{Z_{2T}^2 - r_{2T}^2}. \quad (3.13)$$

### 3.3. Построение внешних характеристик ТП для различных режимов его работы при углах управления $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$

Внешняя характеристика ТП – это зависимость  $E_d = f(I_d)$  при  $U_y = \text{const}$  ( $\alpha = \text{const}$ ) [4]. Внешние характеристики, полученные при различных фиксированных значениях  $U_y$ , образуют семейство внешних характеристик.

В режиме непрерывных токов среднее значение ЭДС ТП  $E_d$  не зависит от тока нагрузки  $I_d$  и определяется только углом управления  $\alpha$  [4]:

$$E_d = E_{d0} \cdot \cos \alpha, \quad (3.14)$$

где  $E_{d0}$  – ЭДС условного холостого хода.

Напряжение же на нагрузке:

$$U_d = E_d - \frac{p \cdot I_d \cdot x_{2T}}{2 \cdot \pi} - I_d \cdot r_{2T} - N \cdot \Delta U_{пр},$$

где  $x_{2T}, r_{2T}$  – индуктивное и активное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке;  $I_d$  – ток нагрузки;  $p$  – пульсность схемы;  $N$  – количество вентилях, одновременно обтекаемых током;  $\Delta U_{пр}$  – прямое падение напряжения на открытом вентиле.

Режим прерывистых токов при углах открывания  $\alpha \geq \alpha_{гр} = 10^\circ 05'$  (при  $p = 6$ ) ограничен эллипсом (рис. 3.2, зона I), который описывается уравнениями [4]:

$$E_{d,гр} = B \cdot \cos \alpha, \quad I_{d,гр} = A \cdot \sin \alpha, \quad (3.15)$$

где  $B = E_{d0}$  – большая полуось эллипса (для трехфазной мостовой схемы  $E_{d0} = 2,34U_{2\phi,ном}$ );  $A$  – малая полуось эллипса:

$$A = \frac{E_{d0}}{k \cdot x_{2T} + x_d} \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{p} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\pi}{p} \right), \quad (3.16)$$

где  $x_{2T}$  – индуктивное сопротивление трансформатора, приведенное к вторичной обмотке;  $x_d = \omega L_{я}$  – индуктивное сопротивление цепи нагрузки;  $k$  – число плеч силовой схемы (для мостовых  $m$ -фазных схем  $k = 2$ );  $p$  – пульсность схемы (для трехфазной мостовой схемы  $p = 6$ ).

Максимальное значение ЭДС  $E'_{d0}$  при холостом ходе ( $I_d = 0$ ) равно значению ЭДС в цепи нагрузки и определяется в зависимости от угла управления  $\alpha$  выражениями [4], [5]:

$$E'_{d0} = \begin{cases} E_{dm}, & \text{при } \alpha < \frac{\pi}{p}, \\ E_{dm} \cdot \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{p}\right), & \text{при } \alpha \geq \frac{\pi}{p}, \end{cases} \quad (3.17)$$

где  $E_{dm}$  – амплитудное значение выпрямленной ЭДС (для трехфазной мостовой схемы  $E_{dm} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi,ном}$ ).

На холостом ходе интервал проводимости тиристорov  $\lambda = 0$ . В режиме прерывистых токов интервал проводимости тиристорov находится в диапазоне  $0 < \lambda < \pi/p$ . Среднее значение тока нагрузки преобразователя в этом режиме определяется выражением [5], [7]:

$$I_d = \frac{p}{\pi} \cdot \frac{E_{2m}}{(k \cdot x_{2T} + x_d)} \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \cdot \sin\left(\frac{\lambda}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha\right) \cdot \left(1 - \frac{\lambda}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2}\right), \quad (3.18)$$

где  $E_{2m}$  – максимальное значение ЭДС вторичной обмотки (для трехфазной мостовой схемы  $E_{2m} = E_{dm} = \sqrt{6} \cdot U_{2\phi,ном}$ ).

ЭДС на выходе ТП в режиме прерывистых [4], [5]:

$$E_d = \frac{E_{2m}}{\lambda} \left( \sin\left(\lambda + \alpha - \frac{\pi}{p}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{p}\right) \right). \quad (3.19)$$

В режиме непрерывного тока ( $\lambda = \pi/p$ ) ЭДС не зависит от тока и график проходит параллельно оси тока нагрузки (рис. 3.2, зона II).

Расчет внешних характеристик ТП удобно производить с помощью программы MathCAD.

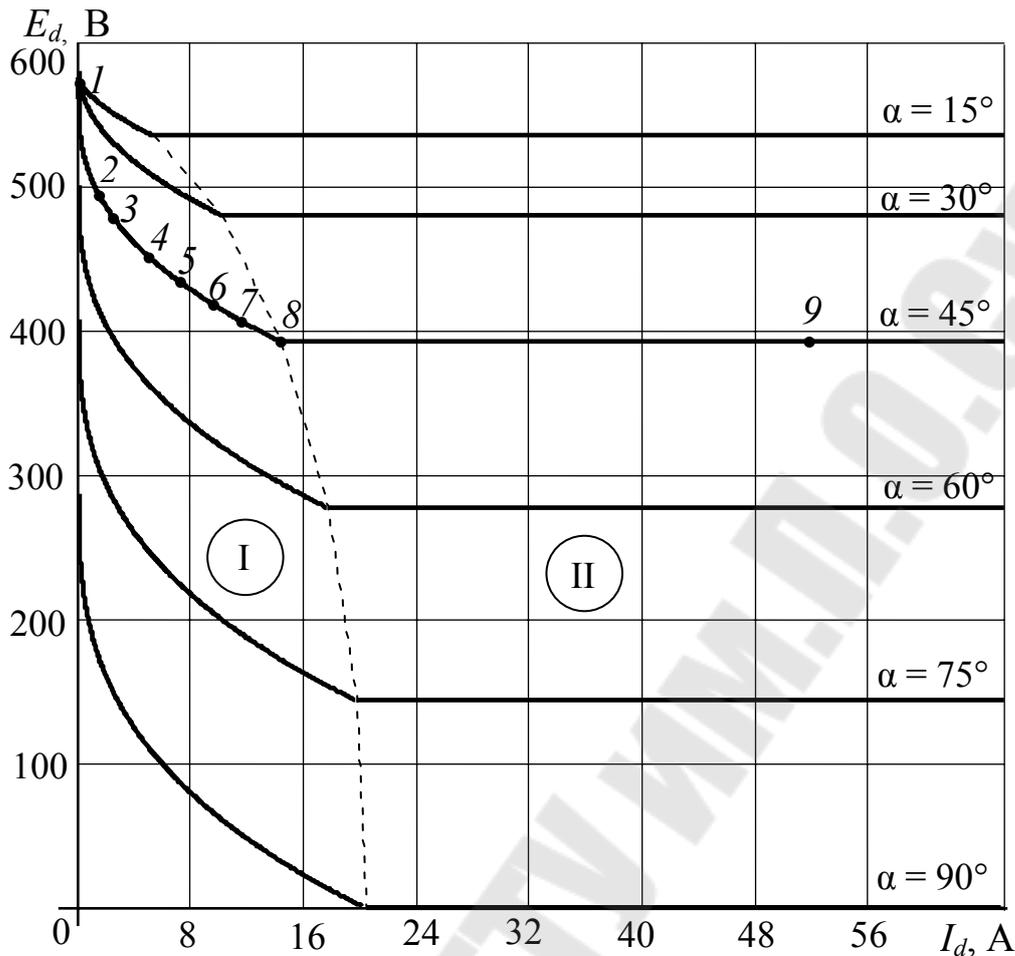


Рис. 3.2. Внешние характеристики ТП при различных углах управления  $\alpha$

*Пример.* Рассмотрим расчет и построение внешней характеристики для трехфазного мостового ТП ( $k = 2, p = 6$ ) при угле управления  $\alpha = 45^\circ$ .

Пусть  $U_{2\phi, \text{ном}} = 236,7$  В,  $x_{2Г} = 0,25$  Ом,  $x_d = \omega \cdot L_{я} = 2,2$  Ом,  $I_{d, \text{ном}} = 52$  А.

По формулам (3.15), (3.16) определяются значения  $B$  и  $A$ , а затем  $E_{d, \text{гр}}$  и  $I_{d, \text{гр}}$  при  $\alpha = 45^\circ$ :

$$B = E_{d0} = 2,34 \cdot U_{2\phi, \text{ном}} = 2,34 \cdot 236,7 = 553,9 \text{ В.}$$

$$A = \frac{E_{d0}}{k \cdot x_{2Г} + x_d} \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{p} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{p} \right) = \frac{553,9}{2 \cdot 0,25 + 2,2} \cdot \left( 1 - \frac{\pi}{6} \cdot \text{ctg} \frac{\pi}{6} \right) = 19,1 \text{ А.}$$

$$E_{d, \text{гр}} = B \cdot \cos \alpha = 553,9 \cdot \cos 45 = 391,67 \text{ В.}$$

$$I_{d,гр} = A \cdot \sin \alpha = 19,1 \cdot \sin 45 = 13,506 \text{ А.}$$

Рассчитанным значениям  $E_{d,гр} = 391,67 \text{ В}$  и  $I_{d,гр} = 13,506 \text{ А}$  соответствует точка 8 на графике (рис. 3.2), которая лежит на границе зон прерывистого и непрерывного токов. В зоне непрерывных токов (рис. 3.2, зона II) характеристика проходит параллельно оси тока нагрузки через точки 8 и 9, где точке 9 соответствуют координаты  $I_d = I_{d,ном} = 52 \text{ А}$  и  $E_d = E_{d,гр} = 391,67 \text{ В}$ .

Для построения внешней характеристики в зоне прерывистых токов (рис. 3.2, зона I) необходимо рассчитать координаты нескольких (7–8) точек в этой зоне. Холостому ходу ТП ( $I_d = 0$ ,  $\lambda = 0$ ) соответствует точка 1. Поскольку угол управления  $\alpha = 45^\circ > \pi/p = 30^\circ$ , то значение ЭДС холостого тока определяется по второй формуле выражения (3.17):

$$\begin{aligned} E'_{d0} &= E_{dm} \cos(\alpha - \pi/p) = \sqrt{6} \cdot U_{2ф,ном} \cos(\alpha - \pi/p) = \\ &= \sqrt{6} \cdot 236,7 \cos(45 - 30) = 567,12 \text{ В.} \end{aligned}$$

Для нахождения координат ( $I_d$ ,  $E_d$ ) промежуточных точек 2, 3, 4, 5, 6, 7 зададим следующие значения интервалов проводимости тиристорov в данных точках:

$$\begin{aligned} \lambda_2 &= 0,55 \cdot \frac{\pi}{3}, \quad \lambda_3 = 0,7 \cdot \frac{\pi}{3}, \quad \lambda_4 = 0,8 \cdot \frac{\pi}{3}, \\ \lambda_5 &= 0,85 \cdot \frac{\pi}{3}, \quad \lambda_6 = 0,9 \cdot \frac{\pi}{3}, \quad \lambda_7 = 0,95 \cdot \frac{\pi}{3}. \end{aligned}$$

Выбор таких значений  $\lambda$  связан с необходимостью получения более равномерной расстановки точек по значениям тока. Определим, для примера, величину тока и ЭДС в точке 2 ( $\lambda_2 = 0,55 \cdot \frac{\pi}{3} = 0,57596 \text{ рад}$ ) по формулам (3.5) и (3.6):

$$\begin{aligned} I_{d2} &= \frac{p}{\pi} \cdot \frac{E_{2m}}{(k \cdot x_{2т} + x_d)} \cdot \sin \frac{\lambda_2}{2} \cdot \sin \left( \frac{\lambda_2}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha \right) \cdot \left( 1 - \frac{\lambda_2}{2} \cdot \text{ctg} \frac{\lambda_2}{2} \right) = \\ &= \frac{6}{\pi} \cdot \frac{579,83}{(2 \cdot 0,25 + 2,2)} \sin \frac{0,57596}{2} \cdot \sin \left( \frac{0,57596}{2} - \frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{4} \right) \times \\ &\times \left( 1 - \frac{0,57596}{2} \cdot \text{ctg} \frac{0,57596}{2} \right) = 1,69 \text{ А.} \end{aligned}$$

$$E_{d2} = \frac{E_{2m}}{\lambda_2} \cdot \left( \sin\left(\lambda_2 + \alpha - \frac{\pi}{p}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{p}\right) \right) = \frac{579,83}{0,57596} \times$$

$$\times \left( \sin\left(0,57596 + \frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{6}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\pi}{6}\right) \right) = 487,56 \text{ В.}$$

Аналогично рассчитываются величины тока и ЭДС в остальных точках. Все результаты расчета внешней характеристики при  $\alpha = 45^\circ$  записываются в табл. 3.2. Указанным выше способом рассчитываются и строятся внешние характеристики при других значениях угла управления  $\alpha$ , а полученные результаты записываем в таблицу, подобную табл. 3.2, дополнив ее строками со значением углов управления.

Таблица 3.2

**Результаты расчета внешней характеристики при  $\alpha = 45^\circ$**

Режим прерывистого тока								Режим непрерывного тока	
Точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha = \frac{\pi}{4} (45^\circ)$									
$\lambda$ , рад	0	$0,55 \cdot \frac{\pi}{3}$	$0,7 \cdot \frac{\pi}{3}$	$0,8 \cdot \frac{\pi}{3}$	$0,85 \cdot \frac{\pi}{3}$	$0,9 \cdot \frac{\pi}{3}$	$0,95 \cdot \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3}$
$I_d$ , А	0	1,69	3,903	6,21	7,67	9,36	11,3	13,50	52,0
$E_d$ , А	567,12	487,56	458,66	437,55	426,49	415,12	403,46	391,67	391,67

**3.4. Расчет и построение скоростных характеристик ДПТ в режиме прерывистого и непрерывного токов при углах управления  $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$**

Скоростная характеристика ДПТ  $\omega = f(I_H)$ , без учета падения напряжения на внутреннем сопротивлении ТП, описывается следующим уравнением [7]:

$$\omega = \frac{E_d}{K_E \cdot \Phi} - \frac{I_H \cdot (R_{я} + R_{дп})}{K_E \cdot \Phi}, \quad (3.20)$$

где  $K_E \cdot \Phi = \frac{U_{ном} - I_{ном} \cdot R_H}{\omega_{ном}}$ ,  $\omega_{ном} = \frac{\pi \cdot n_{ном}}{30}$ .

Значение номинальной частоты вращения  $n_{ном}$  берется из табл. 1.1.

Подставляя в формулу (3.20) величины ЭДС и токов  $I_n$  в различных режимах работы ТП и заданных значений  $\alpha$ , строятся скоростные характеристики ДПТ (рис. 3.3). Расчет скоростных характеристик ТП, также как и внешних, удобно производить в программе MathCAD.

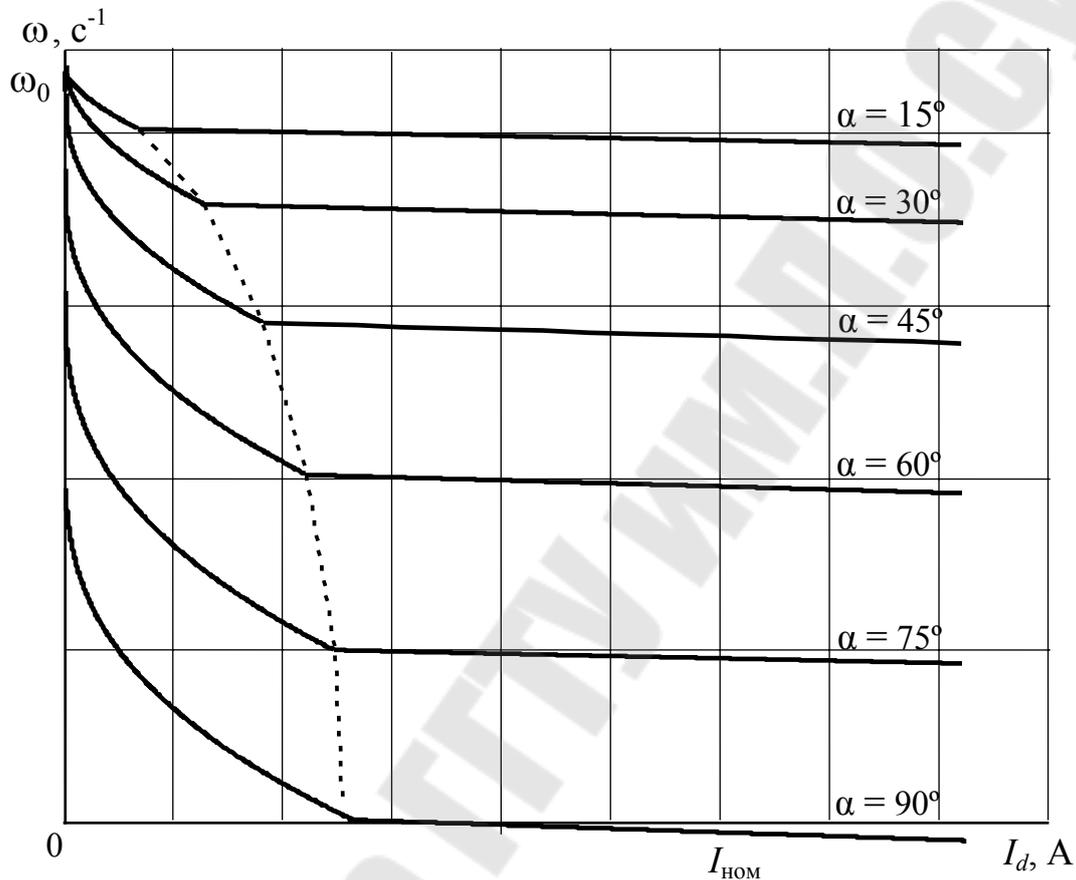


Рис. 3.3. Вид скоростных характеристик ДПТ при различных углах управления  $\alpha$

### 3.5. Построение характеристик управления ТП при $I_d = 0$ , $I_d = 0,5 \cdot I_{d.гр}$ и $I_d = I_{d.гр}$ ( $I_{d.гр}$ берется при $\alpha = 75^\circ$ ) и линейном пилообразном опорном напряжении

Характеристика управления ТП – это зависимость  $E_d = f(U_y)$  при заданном значении тока нагрузки  $I_d$  [4]. Вначале по формулам (3.2) и (3.3) рассчитывается значение  $I_{d.гр}$  при  $\alpha = 75^\circ$ , а затем и значение  $I_d = 0,5 \cdot I_{d.гр}$ . Полученные значения тока, как и значение  $I_d = 0$ , затем используются при построении характеристик управления.

Характеристики управления можно строить графическим или аналитическим способами. В первом случае на графиках внешних характеристик проводятся вертикальные линии, соответствующие токам  $I_d = 0$ ,  $0,5 \cdot I_{d.гр}$  и  $I_{d.гр}$ . В точках пересечения вертикальных линий с внешними характеристиками определяются значения ЭДС  $E_d$  и записываются соответствующие значения угла управления  $\alpha$ . Полученные данные записываются в табл. 3.3 и используются затем при построении характеристик управления (рис. 3.4).

Таблица 3.3

Результаты расчета характеристики управления для  $I_d = 0$

Параметр	Значение					
	90	75	60	45	30	15
$\alpha$ , град.						
$E_d$ , В						
$U_{упр}$ , В						

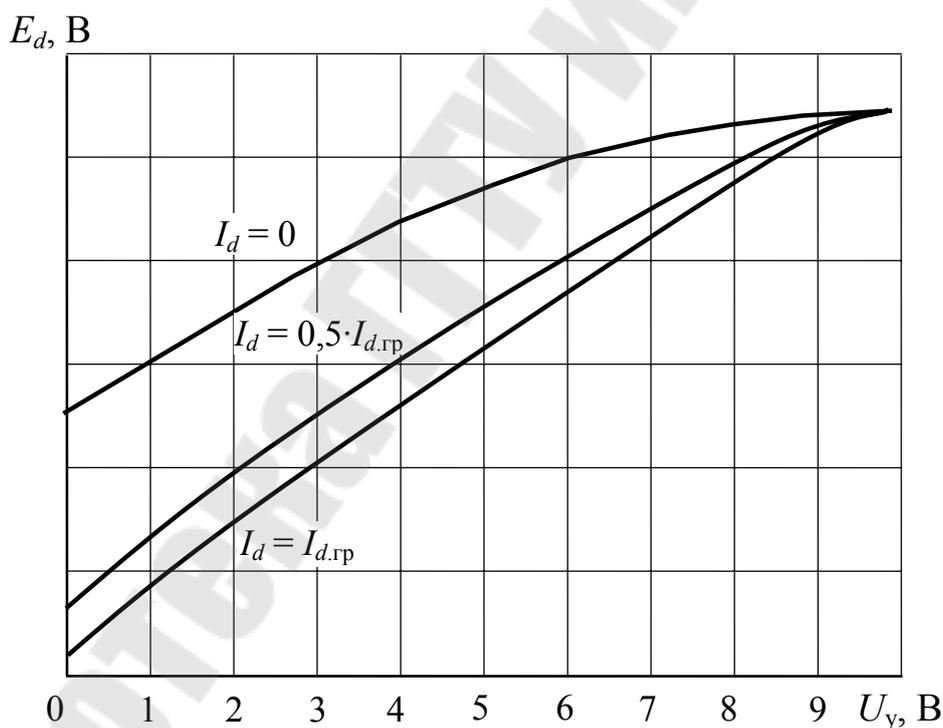


Рис. 3.4. Вид характеристик управления ТП при различных значениях тока нагрузки  $I_d$

Графический способ построения проще аналитического, однако точность полученных таким способом характеристик относительно невелика. Поэтому для построения характеристик управления целесообразнее использовать второй (аналитический) способ.

При аналитическом способе используются формулы (3.5) и (3.6) для  $I_d$  и  $E_d$ . Задаваясь необходимым значением тока  $I_d$  (по заданию три значения:  $I_d = 0, 0,5 \cdot I_{d.гр}$  и  $I_{d.гр}$ ), находим (например, в MathCADe) значение  $\lambda$  для всех значений угла  $\alpha$ .

Далее, подставляя полученные значения  $\lambda$  и угла управления  $\alpha$  в формулу для ЭДС, определяем величину  $E_d$ . Так делаем для трех значений тока  $I_d \cdot (0, 0,5 \cdot I_{d.гр}$  и  $I_{d.гр})$ . Полученные данные также записываются в таблицу, аналогичную табл. 3.3.

Напряжение управления при линейной пилообразной форме  $U_{оп}$  по известному значению угла  $\alpha$  рассчитывается по следующей формуле:

$$U_y = -\frac{2 \cdot U_{оп.макс}}{\pi} \cdot \left( \alpha - \frac{\pi}{2} \right). \quad (3.21)$$

### 3.6. Построение временных диаграмм напряжений и токов в нагрузке при заданных значениях $\alpha$ и тока $I_d$

3.6.1. По формулам (3.15) и (3.16) определяется значение тока  $I_{d.гр}$  при заданном угле управления  $\alpha$ .

3.6.2. Требуемое значение тока  $I_d$ :

$$I_d = [I_d/I_{d.гр}] \cdot I_{d.гр},$$

где отношение  $[I_d/I_{d.гр}]$  берется из табл. 1.1 для своего варианта.

3.6.3. Подставляя значения  $I_d$  и  $\alpha$  в уравнение для тока

$$I_d = \frac{p}{\pi} \cdot \frac{E_{2m}}{(k \cdot x_{2Г} + x_d)} \cdot \sin \frac{\lambda}{2} \cdot \sin \left( \frac{\lambda}{2} - \frac{\pi}{p} + \alpha \right) \cdot \left( 1 - \frac{\lambda}{2} \cdot \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \right),$$

рассчитывается значение  $\lambda$ . Расчет  $\lambda$  необходимо произвести в программе MathCAD.

3.6.4. Далее, подставляя значение  $\alpha$  и  $\lambda$  в выражение для ЭДС

$$E_d = \frac{E_{2m}}{\lambda} \cdot \left( \sin \left( \lambda + \alpha - \frac{\pi}{p} \right) - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{p} \right) \right),$$

определяется значение  $E_d$ .

Используя полученные значения  $\lambda$  и  $E_d$ , а также, зная углы управления  $\alpha$ , амплитуды фазного и линейного напряжений  $U_{2ф.м} = \sqrt{2} \cdot U_{2ф.ном}$  и  $U_{2л.м} = \sqrt{6} \cdot U_{2ф.ном}$ , строятся временные диаграммы напряжений и тока в нагрузке, примерный вид которых представлен на рис. 3.5. Для правильного построения диаграмм необходимо внимательно изучить материал на данную тему в литературе [5], [6], [7].

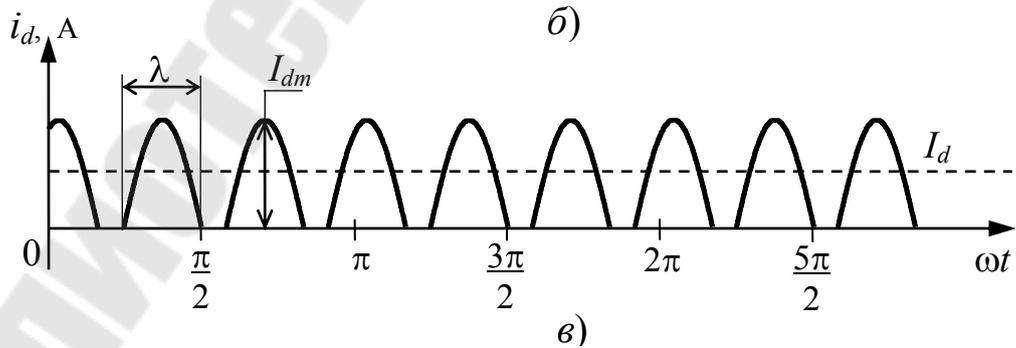
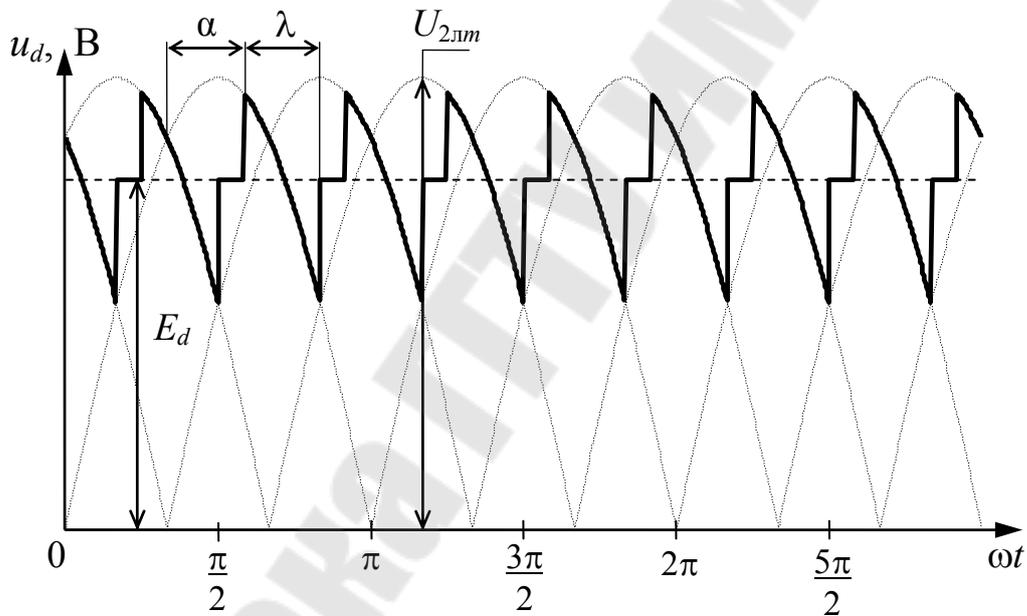
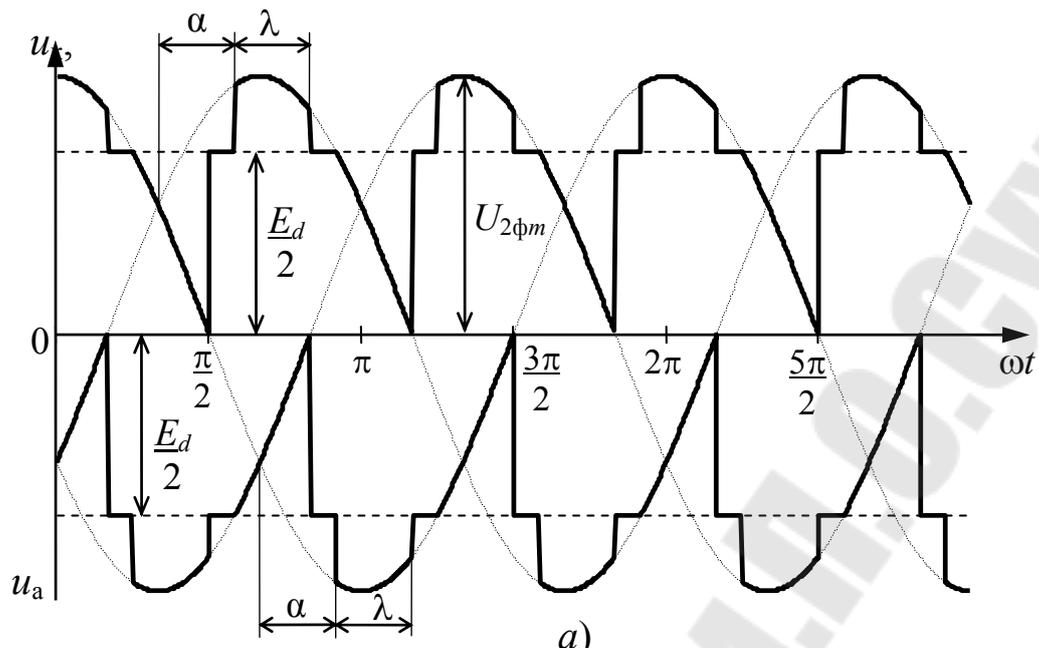


Рис. 3.5. Временные диаграммы:  
 а – напряжения катодной и анодной групп;  
 б – напряжение на выходе ТП; в – ток в нагрузке

#### 4. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

1. Основные координаты, и параметры элемента. Характеристики управления и внешние характеристики ЭАЭП. Определения коэффициента передачи (усиления) элемента по его характеристике управления.

2. Какую величину целесообразней принять за выходную координату управляемого выпрямителя, напряжение или ЭДС и почему? Что такое выходное сопротивление элемента и как оно учитывается в схеме замещения и в характеристиках элемента.

3. Система импульсно-фазового управления ТП. Основные требования и принципы построения.

4. Для чего требуется и как выполняется синхронизация открывающих импульсов с питающим напряжением в трехфазных тиристорных преобразователях? Почему в трехфазных мостовых ТП для управления тиристорами в основном используются удвоенные открывающие импульсы?

5. Функциональная схема блока СИФУ. Влияние формы опорного напряжения на характеристики управления ТП. Обоснуйте линейность результирующей характеристики управления ТП при косинусоидальной форме опорного напряжения СИФУ.

6. Функциональные схемы трехфазных мостовых нереверсивного и реверсивного ТП. Характеристики управления ВГ реверсивного ТП.

7. Структурная схема трехфазного мостового реверсивного ТП с отдельным управлением. Логическое переключающее устройство и его функции.

8. Внешние характеристики ТП в различных режимах его работы. Динамические свойства преобразователя как звена систем автоматического регулирования.

9. Влияние дискретности и неполной управляемости на динамические характеристики преобразователя. Полоса пропускания ТП. Структурные схемы и передаточные функции преобразователя.

10. Широтно-импульсные преобразователи (ШИП) постоянного тока. Блок-схема ШИП и ШИМ.

11. Нереверсивная и реверсивная схемы ШИП. Зависимость выходной ЭДС от скважности импульса. Пульсация тока нагрузки.

12. Схемы нереверсивных ШИП с тиристорными и транзисторными ключами и их внешние характеристики. Характеристики управления ШИП.

13. Тиристорный регулятор напряжения переменного тока (ТРН). Схема однофазного ТРН.
14. Схема трехфазного ТРН. Характеристики управления ТРН. Особенности системы импульсно-фазового управления ТРН.
15. Индуктивно-емкостной преобразователь тока. Назначение и применение. Схема однофазного и трехфазного источников тока (ИТ).
16. Внешняя характеристика источника тока. Механические характеристики двигателя постоянного тока в системе ИТ–ДПТ.
17. Преобразователи частоты. Назначение и применение. Функциональная схема преобразователя частоты (ПЧ) и систем управления.
18. Автономный инвертор тока с интервалом проводимости  $120^\circ$ . Схема, принцип действия, диаграммы работы.
19. Автономный инвертор напряжения с интервалом проводимости  $180^\circ$ . Схема, принцип действия, диаграммы работы.
20. Преобразователи частоты с автономным инвертором напряжения и широтно-импульсным регулированием напряжения.
21. Непосредственные преобразователи частоты (НПЧ). Функциональная схема НПЧ. Трехфазная нулевая схема НПЧ.
22. Трехфазная мостовая схема НПЧ. Характеристика управления НПЧ. Максимальная частота НПЧ. Регуляторы систем управления АЭП. Схемы и характеристики П и ПИ-регуляторов.
23. Пропорционально-дифференциальный (ПД) и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регуляторы. Схемы и характеристики.
24. Регулятор с функциональным потенциометром. Адаптивные регуляторы.
25. Задатчики интенсивности (ЗИ). Схема и характеристики ЗИ на операционных усилителях.
26. Согласующие элементы. Фазовый детектор (демодулятор).
27. Датчики угла и рассогласования. Сельсины. Характеристика управления сельсина в амплитудном и фазовом режимах.
28. Синусно-косинусные вращающиеся трансформаторы (СКВТ). Работа СКВТ в амплитудном режиме.
29. Работа СКВТ в режиме фазовращателя. Принцип действия, характеристика управления.
30. Цифровые датчики угла. Характеристика управления цифрового датчика с трехразрядным кодовым диском.
31. Датчики скорости. Тахогенераторы постоянного тока. Характеристика управления тахогенератора.

32. Тахогенераторы переменного тока. Амплитудная и фазовые характеристики асинхронного тахогенератора.

33. Цифровые датчики скорости (ЦДС). Структурная схема ЦДС. ЦДС с фотоэлектрическим кодовым диском.

34. Датчики электрических машин. Структурные схемы аналоговых и цифровых датчиков (ДН) и тока (ДТ). Схемы датчика напряжения, тока.

35. Датчики проводимости вентиля преобразователей (ДПВ). Назначение и схема ДПВ.

36. Преобразователи напряжение–частота. Схема и характеристики преобразователя.

37. Импульсные модуляторы. Схемы и характеристики импульсных модуляторов.

38. Цифровой задатчик интенсивности. Схема и характеристики ЗИ.

39. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП). Схемы, назначение и применение.

40. Аналого-цифровые преобразователи (АЦП). Схемы, назначение и применение.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник по электрическим машинам : в 2 т. / под общ. ред. И. П. Копылова, Б. К. Клокова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 1. – 456 с.
2. Анхинюк, В. Л. Проектирование систем автоматического управления электроприводами : учеб. пособие для вузов / В. Л. Анхинюк, О. Ф. Опейко. – Минск : Выш. шк., 1986. – 143 с.
3. Комплектные тиристорные электроприводы : справ. / И. Х. Евзеров [и др.] ; под ред. В. М. Перельмутера. – Москва : Энергоиздат, 1988. – 319 с.
4. Терехов, В. М. Элементы автоматизированного электропривода : учеб. для вузов / В. М. Терехов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.
5. Башарин, А. В. Управление электроприводами : учеб. пособие для вузов / А. В. Башарин, В. А. Новиков, Г. Г. Соколовский. – Ленинград : Энергоиздат, 1982. – 392 с.
6. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники : учеб. для вузов / В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко. – Москва : Высш. шк., 1980. – 424 с.
7. Справочник по проектированию электропривода и систем управления технологическими процессами / под ред. В. И. Круповича, Ю. Г. Барыбина, М. Л. Самовера. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 486 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Таблица П.1.1

**Тип и параметры двигателя постоянного тока [1]**

Номер варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}, \text{кВт}$	$U_{\text{ном}}, \text{В}$	$\eta_{\text{ном}}, \%$	$n_{\text{ном}}, \text{об/мин}$	$R_{\text{я}}, \text{Ом}$	$R_{\text{дп}}, \text{Ом}$	$L_{\text{я}}, \text{мГн}$	$\alpha, \text{град.}$	$I_{\text{д}}/I_{\text{д.гр.}} (I_{\text{д.гр.}} \text{ при } \alpha \text{ п. 10})$	Номер вопроса
1	2ПН132М	4	220	79	1500	0,564	0,336	11	20	0,85	40
2	2ПН132L	8,5	440	84,5	2240	0,67	0,445	14	25	0,8	35
3	2ПН160М	13	220	85,5	2120	0,081	0,056	2,2	30	0,75	33
4	2ПН160L	16	220	86,5	2360	0,044	0,031	1,4	35	0,7	36
5	2ПН180М	26	440	89	2240	0,15	0,092	4,9	40	0,65	32
6	2ПН180L	42	440	90,5	3000	0,065	0,044	2,2	45	0,6	37
7	2ПН200L	75	440	91,5	3150	0,031	0,02	1,2	50	0,5	31
8	2ПН132М	7,0	220	83	2240	0,226	0,166	4,6	55	0,45	10
9	2ПН132L	5,5	220	80,5	1500	0,322	0,27	7	60	0,4	38
10	2ПН132М	10,5	440	85	3000	0,564	0,336	11	65	0,35	30
11	2ПН132L	14	440	86,5	3150	0,322	0,27	7	70	0,3	9
12	2ПН160М	18	220	87	3150	0,037	0,024	1	75	0,25	39
13	2ПН160L	11	440	85,5	1600	0,385	0,364	12,5	22	0,83	29
14	2ПН180М	15	220	85,5	1500	0,084	0,056	2,7	27	0,78	8
15	2ПН180L	18,5	220	87	1500	0,065	0,044	2,2	32	0,73	19
16	2ПН180М	37	440	79,5	3150	0,084	0,056	2,7	37	0,68	28
17	2ПН180L	30	440	89	2200	0,136	0,084	4,4	42	0,63	7
18	2ПН200М	36	220	88,5	2200	0,026	0,016	0,9	47	0,58	17
19	2ПН200L	53	440	90,5	2360	0,055	0,037	2,1	52	0,53	27
20	2ПН200М	60	440	90,5	3150	0,047	0,029	1,6	57	0,48	6
21	2ПН200М	22	220	87,5	1500	0,047	0,029	1,6	62	0,43	16
22	2ПБ200L	6,0	220	84,5	800	0,22	0,15	9,4	67	0,38	26
23	2ПФ180L	10	440	78	750	0,99	0,644	32	72	0,33	5
24	2ПО180L	20	220	90	3000	0,025	0,018	0,92	24	0,81	15
25	2ПБ200L	15	440	90	2360	0,125	0,08	5,3	29	0,76	25
26	2ПО160М	8,0	220	86,5	2240	0,145	0,101	4,6	34	0,71	4
27	2ПН160L	4,0	440	78,5	750	2,02	1,8	63	39	0,66	14
28	2ПФ132М	7,5	220	85	3000	0,14	0,094	2,85	44	0,61	24
29	2ПБ132L	5,3	220	85,5	3000	0,167	0,124	4	49	0,56	4
30	2ПО132L	6,7	440	86,5	3000	0,518	0,323	11,6	54	0,51	13
31	2ПО180М	17	440	90	3000	0,15	0,092	5,6	59	0,46	23
32	2ПФ180М	26	220	89	3150	0,022	0,015	0,68	64	0,36	3

Окончание табл. П.1.1

Номер варианта	Тип двигателя	$P_{\text{ном}}$ , кВт	$U_{\text{ном}}$ , В	$\eta_{\text{ном}}$ , %	$n_{\text{ном}}$ , об/мин	$R_{\text{я}}$ , Ом	$R_{\text{дл}}$ , Ом	$L_{\text{я}}$ , мГн	$\alpha$ , град.	$I_d/I_{d,\text{гр}}$ ( $I_{\text{длр}}$ при $\alpha$ п. 10)	Номер вопроса
33	2ПН200М	13	220	85	1120	0,106	0,061	3,6	69	0,31	18
34	2ПН200L	30	440	89,5	1600	0,185	0,08	4,6	74	0,26	22
35	2ПБ132L	5,3	440	85,5	3150	0,562	0,407	13,6	28	0,72	2
36	2ПФ180L	25	220	89	2120	0,042	0,03	0,81	33	0,67	12
37	2ПФ180М	12	220	82	1060	0,15	0,092	4,9	38	0,62	21
38	2ПН200М	8,5	220	82	800	0,188	0,116	6,4	43	0,57	1
39	2ПН200L	16	440	86	1000	0,343	0,224	12,9	48	0,52	11
40	2ПБ160L	8,1	220	86,5	3350	0,044	0,031	1,6	53	0,47	20

## Содержание

1. Общие требования к выполнению контрольной работы .....	3
2. Задание к контрольной работе .....	4
3. Рекомендации к выполнению контрольной работы.....	5
3.1. Функциональная схема трехфазного нереверсивного мостового тиристорного преобразователя с нагрузкой ДПТ НВ представлена на рис. 3.1. ....	5
3.2. Расчет и выбор силового трансформатора для питания тиристорного преобразователя .....	6
3.3. Построение внешних характеристик ТП для различных режимов его работы при углах управления $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ .....	9
3.4. Расчет и построение скоростных характеристик ДПТ в режиме прерывистого и непрерывного токов при углах управления $\alpha = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ, 90^\circ$ .....	13
3.5. Построение характеристик управления ТП при $I_d = 0, I_d = 0,5 \cdot I_{d.гр}$ и $I_d = I_{d.гр}$ ( $I_{d.гр}$ берется при $\alpha = 75^\circ$ ) и линейном пилообразном опорном напряжении .....	14
3.6. Построение временных диаграмм напряжений и токов в нагрузке при заданных значениях $\alpha$ и тока $I_d$ .....	16
4. Теоретические вопросы к контрольной работе .....	18
Литература .....	21
Приложение 1 .....	22

Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Погуляев Михаил Никифорович**  
**Логвин Владимир Васильевич**  
**Захаренко Владимир Сергеевич**

## **ЭЛЕМЕНТЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**Методические указания  
к контрольным работам по одноименной дисциплине  
для студентов специальности 1-53 01 05  
«Автоматизированные электроприводы»  
заочной формы обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *Н. В. Гладкова*  
Компьютерная верстка *Н. Б. Козловская*

Подписано в печать 26.03.09.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Цифровая печать. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,13.

Изд. № 94.

E-mail: [ic@gstu.gomel.by](mailto:ic@gstu.gomel.by)

<http://www.gstu.gomel.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0131916 от 30.04.2004 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.